УДК 621.311.6

АППАРАТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СЭС АВТОМАТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Ю.А. Шиняков

Томский университет систем управления и радиоэлектроники
E-mail: Shua@main.tusur.ru

Рассмотрены структурная схема системы электроснабжения с секционированной солнечной батареей и способы управления энергопреобразующей аппаратурой, обеспечивающие возможность создания надежных высоковольтных систем электроснабжения автоматических космических аппаратов.

Одним из направлений совершенствования технических характеристик бортовых систем автоматических космических аппаратов (КА) является разработка принципов и способов построения высокоэффективных систем электроснабжения (СЭС) с повышенным до 100 В выходным напряжением.

Приобретенный опыт проектирования низковольтных СЭС (27...40 В), безусловно, может быть применен и к высоковольтным. Однако практика показывает невозможность механического использования многих наработанных ранее технических решений, так как возникает ряд проблем, обусловленных повышением напряжений солнечных и аккумуляторных батарей (СБ и АБ) [1].

Повышение напряжения АБ за счет увеличения количества аккумуляторов в последовательной цепочке приводит к снижению ее надежности и ресурса работы. Для обеспечения длительной эксплуатации такой АБ требуются более сложные алгоритмы управления ее работой, предусматривающие углубленный контроль состояния аккумуляторов и специальные режимы для восстановления характеристик.

Повышение выходного напряжения СЭС непосредственно отражается на построении силовых преобразователей аппаратуры регулирования и контроля (АРК). Серьезные трудности возникают с построением входных и выходных фильтров преобразователей. Повышение рабочего напряжения в сочетании, как правило, с условиями эксплуатации вне герметичного отсека КА приводит к существенному увеличению массы фильтров. Практика показывает, что масса конденсаторных фильтров одинаковой емкости, выполненных на танталовых конденсаторах и рассчитанных на рабочие напряжения 27 В и 100 В, различается в 5...7 раз. Задача оптимизации параметров фильтров является одной из основных, и ее решение определяет массогабаритные показатели высоковольтных силовых преобразователей.

Основным средством минимизации массы фильтров является повышение рабочей частоты преобразующих устройств. Однако повышение частоты приводит к повышению потерь, особенно динамических в активных элементах. Отсюда вытекают более жесткие требования к параметрам силовых транзисторов и диодов, в первую очередь к их быстродействию.

Повышение рабочей частоты высоковольтных преобразователей приводит к тому, что наращивание мощности необходимо осуществлять параллельным соединением модулей, каждый из которых представляет собой отдельный преобразователь с одним силовым ключом и индивидуальной системой управления. Параллельное соединение силовых ключей и управление от общего регулятора нежелательно, так как сложно гарантировать идентичность их динамических режимов.

Повышение напряжения СБ также сопряжено с рядом трудностей. Напряжение «холодной» СБ при выходе КА из тени Земли может в три раза превышать номинальное, т. е. превысить 300 В. Такое напряжение недопустимо из-за возможности возникновения в условиях вакуума электростатических разрядов между цепочками фотодиодов СБ или элементами токосъема. Для ограничения напряжения на СБ требуется применение специальных устройств.

Повышение напряжения СБ приводит к увеличению различий параметров секций, образованию локальных максимумов мощности на вольт-ваттной характеристике и затруднению работы регулирующих устройств. Рациональным решением этой проблемы является использование индивидуальных регуляторов напряжения секций СБ.

На рис. 1 приведена структурная схема с секционированной СБ, обеспечивающая возможность создания высокоэффективной надежной высоковольтной СЭС [2].

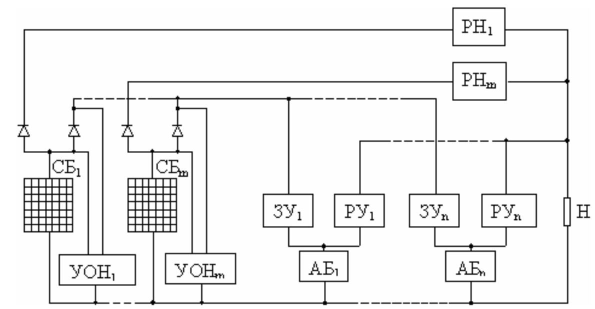


Рис. 1. *Система электроснабжения с секционированной СБ*

Построение СЭС по предложенной структуре позволяет преодолеть названные трудности и проблемы проектирования высоковольтных СЭС. Отличительной особенностью является то, что регулятор напряжения (РН) выполнен из m каналов

PH_1–PH_m (по числу секций СБ), причем каждая секция СБ соединена через дополнительно введённые диоды с силовым входом соответствующего канала регулятора напряжения и общей шиной заряда АБ. В такой системе реализуется принцип последовательного функционирования каналов РН путем разделения диапазона регулирования выходного напряжения на *m* рабочих поддиапазонов. При каждом значении мощности нагрузки Н только один канал находится в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ), а все остальные – в одном из двух состояний: полностью открытые или полностью закрытые силовые ключи.

В каналах РН с полностью открытыми силовыми ключами динамические потери в транзисторах и диодах отсутствуют, имеются только статические потери мощности от протекания тока нагрузки. Только в одном канале РН, работающем в режиме ШИМ, имеется динамическая составляющая потерь мощности. Таким образом, суммарные потери мощности и пульсации выходного напряжения в режиме питания нагрузки от СБ через РН существенно снижаются.

Устройства ограничения напряжения УОН представляют собой силовые ключи, которые при достижении напряжением на общей шине заряда АБ некоторого порогового значения начинают последовательно замыкать накоротко секции СБ. При этом суммарная мощность, генерируемая оставшимися в работе секциями СБ, уменьшается, мощность нагрузки перераспределяется между работающими секциями, напряжение понижается. Происходит отключение требуемого количества секций, напряжение на входной шине зарядных устройств ЗУ не выходит за допустимые пределы. В случае, если мощность нагрузки становится больше мощности СБ, стабилизацию напряжения на выходной шине СЭС обеспечивают разрядные устройства РУ.

Такой способ широко применяется, когда возможно разделение диапазона изменения регулируемого параметра на рабочие поддиапазоны, определенные для каждого устройства. Однако при большом количестве секций СБ и РН диапазон регулирования может оказаться недопустимо большим.

Возможность последовательной работы энергопреобразующих устройств (ЭПУ) без увеличения диапазона регулирования выходного напряжения реализует способ управления СЭС с динамическим смещением уровней регулирования (УР), который обеспечивает последовательную работу силовых устройств организацией взаимного воздействия устройств управления регуляторами (рис. 2).

Для управления регуляторами напряжения РН текущее значение стабилизируемого выходного напряжения СЭС Uос сравнивается усилителями ошибки УО с постоянным опорным напряжением Uоп. С помощью полученных сигналов рассогласования и напряжения пилообразной формы Uпил компараторами К формируются ШИМ-сигналы управления регулирующими элементами Uшим. Демодуляторы ДМ2 и ДМ1 осуществляют воздействие на сигналы управления преобразователями путем демодуляции прямого и инверсного ШИМ-сигналов. При этом демодулированные прямой и инверсный сигналы управления *i*-м преобразователем смещают соответственно уровень регулирования (*i*+1)-го преобразователя в сторону повышения, а уровень регулирования (*i*–1)-го преобразователя в сторону понижения.

Таким образом, при изменении внешних воздействующих факторов осуществляется автоматическое подключение к выходу системы нужного количества источников энергии при автоматическом выборе регулирующего канала. При этом нет необходимости в разделении допустимого диапазона изменения выходного напряжения на поддиапазоны регулирования, то есть преобразователи всех каналов настраиваются и работают с одним уровнем стабилизируемого напряжения, определяемым *U*оп.

Рассмотренные способы управления обеспечивают возможность организации работы источников энергии СЭС (секций СБ) в нужной последовательности, используя контур обратной связи по напряжению. В то же время алгоритмы функционирования СЭС, как правило, предусматривают не только последовательную, но и параллельную работу буферных источников энергии (АБ). При этом к СЭС предъявляются требования по распределению токов между источниками в заданных соотношениях. Кроме того, ЭПУ достаточно мощного источника энергии обычно выполняется путем параллельного включения нескольких менее мощных преобразующих модулей и ставится задача равномерного распределения токов между ними. Для этих целей используется контур обратной связи по току.

Общеизвестны способы выравнивания токов между ЭПУ, подключенных к разным источникам энергии, но имеющих одинаковые значения опорного напряжения и охваченных общей отрицательной обратной связью (ООС) по напряжению. Это способы с местной ООС по току или по отклонению тока от среднего/максимального значения. При выборе способа выравнивания токов следует принимать во внимание степень его влияния на точность стабилизации выходного напряжения системы с учетом конкретного варианта построения схемы управления ЭПУ.

Под местной ООС по току подразумевается корректирующее воздействие, уменьшающее длительность открытого состояния силовых ключей ЭПУ с ростом протекающего тока. Практически это сводится к введению такого воздействия на усилитель рассогласования, которое понижает уровень выходного напряжения, стабилизируемого данным ЭПУ. Поскольку, как было отмечено выше, все параллельно работающие ЭПУ имеют одинаковые опорные напряжения и общее напряжение обратной связи, силовые ключи этого ЭПУ «прикрываются». Устойчивое состояние системы характеризуется выравниванием воздействия на усилители

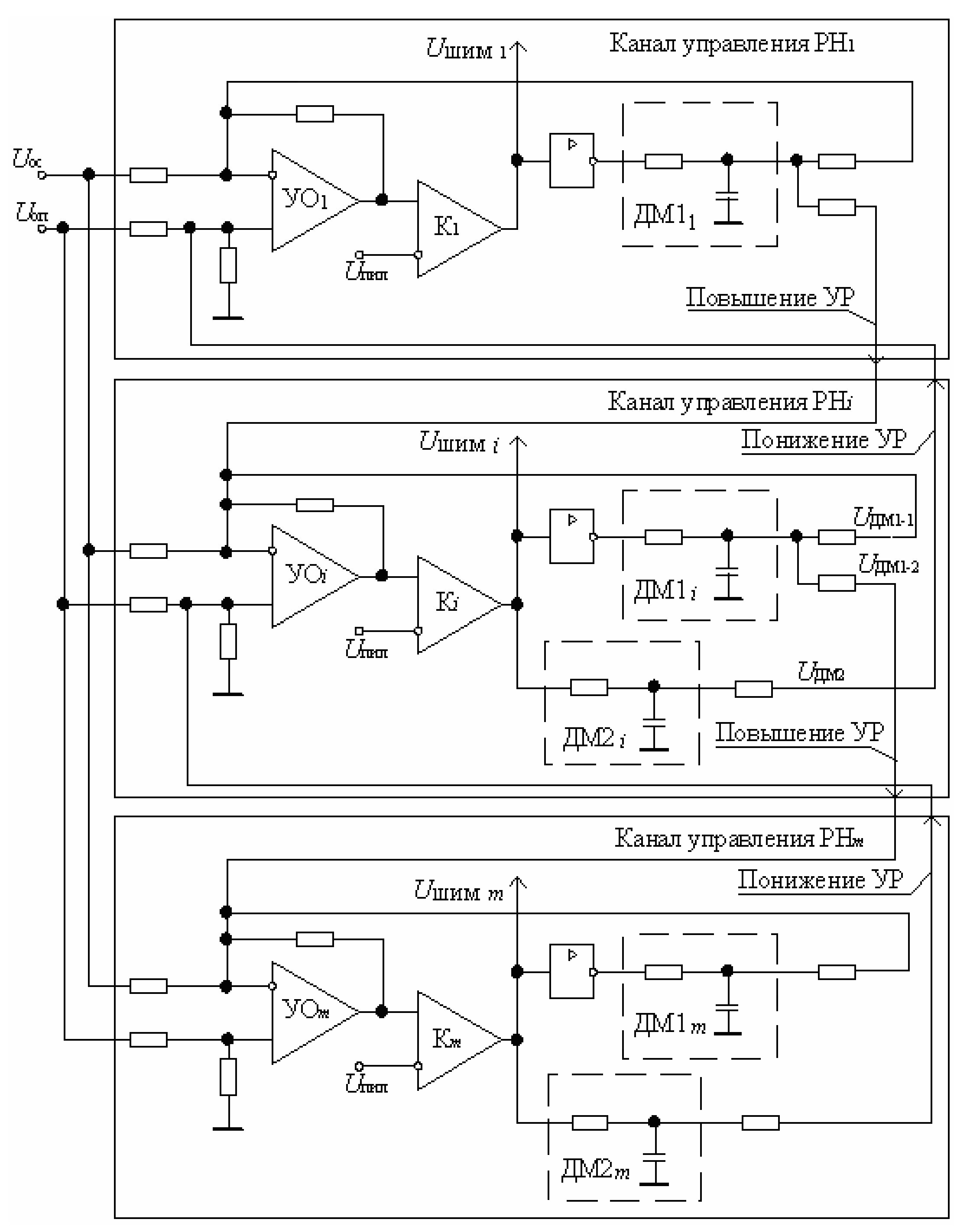


Рис. 2. *Схема управления СЭС с динамическим смещением уровней регулирования ЭПУ*

рассогласования всех ЭПУ, что означает и выравнивание токов.

Недостаток данного способа очевиден и заключается в существенно «падающей» внешней характеристике системы. Однако в случае, если снижение выходного напряжения в результате действия местной ООС по току укладывается в заданные требования из-за наличия сильной обратной связи по напряжению, использование этого способа становится целесообразным, ввиду отсутствия перекрестных связей между ЭПУ.

Способ выравнивания токов с ООС по отклонению тока от заданного значения предполагает наличие ведущего ЭПУ, осуществляющего стабилизацию напряжения на выходе системы и задающего значение тока, которое с определенной точностью повторяют ведомые ЭПУ. Разделение ЭПУ на ведущие и ведомые может быть задано жестко, но тогда возникает проблема обеспечения нормальной работы системы при отказе ведущего ЭПУ. Более целесообразен способ управления, когда «ведущее» ЭПУ выбирается автоматически исходя из

критерия наибольшего тока [3]. В этом случае отказ «ведущего» ЭПУ приводит лишь к тому, что его функции начинает выполнять другой согласно принятому критерию.

На рис. 3 показана схема управления ЭПУ (условно обозначенного первым номером), входящего в состав системы из *m* ЭПУ, функционирующая по названному выше способу. Уровень напряжения, стабилизируемого ЭПУ, определяется опорным напряжением *U*оп и напряжением смещения, поступающим от усилителя ошибки регулирования тока УО*I*1. С помощью УО*I*1 сигнал *U*ДТ1, пропорциональный току данного ЭПУ, сравнивается с сигналом, пропорциональным наибольшему из токов всех ЭПУ, входящих в систему. Этот сигнал формируется детектором максимального тока ДМТ в результате обработки информации с *m* датчиков тока.

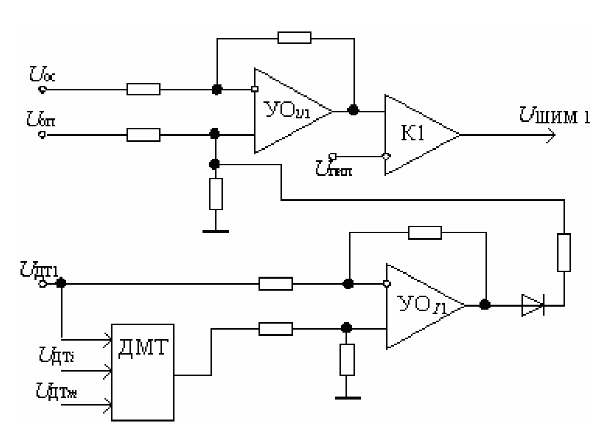


Рис. 3. *Схема управления ЭПУ с ООС по отклонению тока от заданного значения*

В случае, если ток данного ЭПУ, рис. 3, максимален, входные сигналы усилителя УО*I*1 оказываются равными, т. е. его выходной сигнал равен нулю и не влияет на контур регулирования напряжения. Это ЭПУ является «ведущим» и осуществляет стабилизацию напряжения на уровне, определяемом *U*оп.

Если наибольший ток протекает через какой-либо из 2...*m* ЭПУ, на выходе усилителя УО*I*1 появляется сигнал, воздействующий на усилитель ошибки регулирования напряжения УО*U*1 таким образом, что уровень стабилизации повышается. Это приводит к увеличению тока через ЭПУ. В результате токи всех ЭПУ системы выравниваются.

Помимо цепей ОС по току и напряжению, СЭС может содержать контуры регулирования, предназначенные для выполнения ряда специальных функций, таких как экстремальное регулирование мощности СБ [4], реализация аварийных и восстановительных режимов работы АБ и др. [5]. Механизм реализации всех этих функций сводится к введению дополнительных корректирующих воздействий на усилители рассогласования напряжения или тока в соответствии с заданными алгоритмами.

Структурная схема с секционированной СБ, рассмотренная в настоящей статье, обеспечивает возможность ограничения напряжения СБ на заданном уровне и тем самым позволяет решить ряд проблем, обусловленных повышением напряжения охлажденной СБ. Способы управления ЭПУ с динамическим смещением уровней регулирования и распределения токов с ООС по отклонению тока от максимального значения позволяют создавать СЭС с любым уровнем выходной мощности и произвольным количеством АБ и секций СБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черданцев С.П., Шиняков Ю.А., Гордеев К.Г., Тараканов К.В. Разработка и исследования аппаратуры регулирования и контроля внегермоконтейнерного исполнения с выходным напряжением 100 В // Малые спутники. Новые технологии, миниатюризация. Области эффективного применения в XXI веке: Матер. III Междунар. конференции-выставки. – Королев, 2002. – Кн. 3. – С. 185–190.
2. Пат. 2156534 РФ. МПК[7] H02J 7/34, 7/35. Автономная система электроснабжения / К.Г. Гордеев, С.П. Черданцев, Ю.А. Шиняков. Изобретения. 2000. – № 26.
3. А.с. 1206763 СССР. МКИ[4] G05F 1/59. Многоканальная система электропитания с равномерным токораспределением / К.Г. Гордеев, Ю.А. Шиняков, С.П. Черданцев, В.О. Эльман. Открытия. Изобретения. 1986. – № 3.
4. Пат. 2101831 РФ, МКИ[6] H02J 7/35. Система электропитания с экстремальным регулированием мощности фотоэлектрической батареи / К.Г. Гордеев, С.П. Черданцев, Ю.А. Шиняков. Изобретения. 1998. – № 1.
5. Пат. 2168828 РФ. МПК[7] H02J 7/36. Способ управления автономной системой электроснабжения / К.Г. Гордеев, С.П. Черданцев, Ю.А. Шиняков, А.И. Поздняков, А.И. Назимко. Изобретения. 2001. – № 16.